

歩行者の動きの解析と衝突予測に基づく 公共空間における視覚障害者向け歩行支援システム

粥川 青汰¹ 石原 辰也² 高木 啓伸² 森島 繁生³ 浅川 智恵子^{2,4}

概要：本研究では多数の人が行き交う公共空間内において、視覚障害者が周囲の歩行者の動きに合わせて衝突を回避しながら移動できるように支援するシステムを提案する。提案システムは周囲の歩行者の動きを解析することで、衝突の危険性をリアルタイムに予測し、ユーザに警告する。提案システムは、歩く方向を変えずに速度を調整しながら衝突を回避する On-path mode と、歩行者を迂回しながら回避する Off-path mode の二種類の回避モードをユーザに提供する。本研究では、歩行者回避のための警告や案内を行う際に適切なインタフェースを明らかにするために、音声または触覚を用いたインタフェースを二種類用意し、14 名の全盲の視覚障害者による評価実験を行った。評価の結果、提案システムを用いることで歩行者との衝突を回避可能であること、ユーザは環境音を聞き取りやすい触覚インタフェースを好むことを確認した。

1. はじめに

多数の人が行き交う公共の場を歩く際、晴眼者は周囲の歩行者の挙動に合わせて歩く速さや方向を調整しながら歩行者との衝突を回避している。具体的なシチュエーションとしては、目の前を横切る人がいた場合は歩く速度を遅くして道を譲る、通路の中央で人が立ち止まっている場合は空いているスペースを見つけて迂回する、などがあげられ、晴眼者は日常的に周囲の歩行者の動きを確認しながら公共空間内を歩いている。しかしながら、白杖や点字ブロックなどの触覚フィードバックを頼りに移動している視覚障害者にとって、晴眼者のように周囲の歩行者の動きにあわせて衝突を回避しながら歩くことは困難である。これまで視覚障害者の衝突回避支援を目的として、周囲の障害物に関する情報をユーザに知らせるシステム [11], [13], [29] や、周囲の歩行者に向けて警告音を鳴らすことでユーザに道を譲るように促すシステム [10] などが研究されてきた。しかしながら、視覚障害者が周囲の歩行者の動きに合わせて衝突を回避し、晴眼者と同じように公共空間内を移動することを目指した研究は未発達である。

そこで本研究では、視覚障害者が周囲の歩行者の動きにあわせて歩く速度を調整する、あるいは立ち止まった人を回避する、という二種類の行動を使い分けながら移動できるように支援するシステムを提案する。提案システムは周

囲の歩行者や空間の検出結果および歩行者との衝突予測結果に基づき、On-path mode と Off-path mode の二種類の回避モードをユーザに提供する。On-path mode では、ユーザの進行方向を横切る歩行者がいた場合に、システムからユーザへ歩く速度を遅くするように指示を与える。また Off-path mode では、ユーザの進行方向を塞いで立ち止まっている人がいた場合に、その人を避けて再びユーザの歩いていた経路にもどるような経路をシステムが自動で生成し、ユーザを案内する。

図 1 に示したように、歩行者との衝突を予測するために提案システムはまず、スーツケースに取り付けられた light detection and ranging (LiDAR) センサーと、inertial measurement unit (IMU) センサによる simultaneous localization and mapping (SLAM) を用いてユーザ自身の位置と歩く速度を計算する。次に 2 台の RGBD カメラと Convolutional Neural Network を利用した物体検出手法を用いて人物の位置を検出する。SLAM の結果と人物検出結果を組み合わせることで歩行者のトラッキングおよび歩行者との衝突の危険性の予測を行う (図 1 (1))。システムが衝突の危険性を検出した場合、On-path mode ではユーザに対して衝突の危険性を警告することで、歩く速度を落として衝突を回避するように促す (図 1 (2))。ユーザの経路上を人が立ち止まって塞いでいた場合はシステムが衝突の危険性を警告し続ける。このとき、ユーザはシステムに取り付けられたボタンを押して Off-path mode に切り替えることで、システムの案内にしたがって立ち止まった人を迂回しながら回避することが可能となる (図 1 (3))。

¹ 早稲田大学

² IBM Research

³ 早稲田大学理工学術院総合研究科

⁴ Carnegie Mellon University

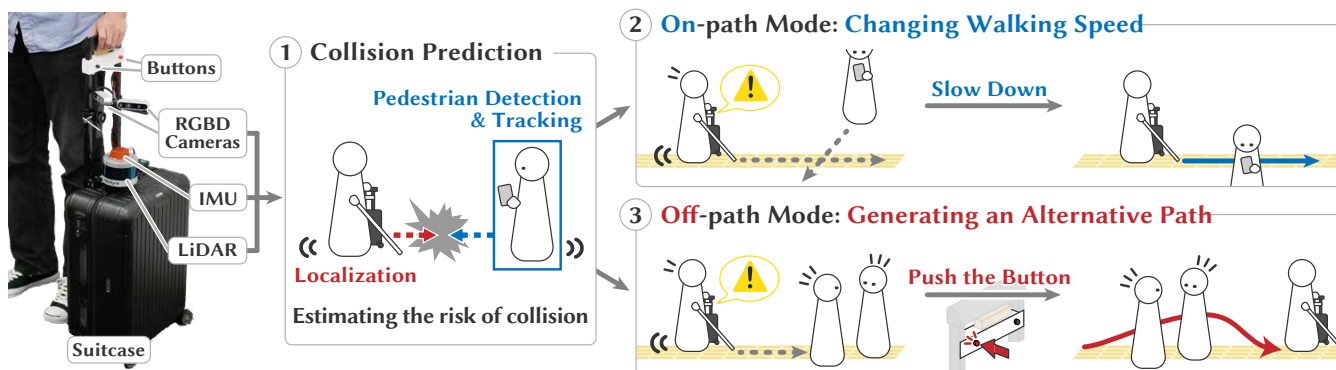


図 1 提案システムの概要図

視覚障害者へ情報を伝達する手段として、これまで音声 [1], [5], [25] や触覚 [24], [26], [27], [29] を用いたインタフェースが多く提案されてきたが、それぞれのインタフェースには長所短所が報告されている。例えば音声インタフェースは指示を明瞭に伝達することが可能だが、視覚障害者が普段聞き取っている周囲の環境音が聞こえづらくなるという欠点がある [15]。一方で触覚インタフェースは環境音の聞き取りを邪魔する可能性は低い、音声よりも単純な情報しか伝達できないという欠点がある。さらに、各インタフェースの特性は使用する状況やタスクに大きく依存するため、本論文で対象としている歩行者との衝突回避において、どのような手段を用いることが適切であるかは自明ではない。そこで本研究では音声と触覚それぞれを使用したインタフェースを二種類実装し、実際に視覚障害者に使用してもらうことで、各インタフェースの有効性を調査した。音声インタフェースは骨伝導ヘッドセットを通して、ピープ音を用いて衝突の危険性を、合成音声を用いて歩行者を回避する経路を伝える。触覚インタフェースは、スーツケースのハンドルを振動させることで衝突の危険性を、ハンドルの下に取り付けたレバー (Directional Lever) の指し示す方向で進むべき経路を伝える。

本研究では 14 人の全盲の視覚障害者を実験参加者として集め、システムおよび各インタフェースの有効性を検証した。実験では事前に歩行者の動きを設定したコントロール環境と、不特定多数の人が行き交う実環境の二種類の環境を用意し、システムを使用しながら各環境内を移動するタスクを与えた。評価の結果、以下の知見が得られた。

- コントロール環境および実環境どちらの環境においても、ユーザは提案システムを使用することで歩行者との衝突を回避しながら移動することが可能。
- On-path mode において振動するハンドルを用いる触覚インタフェースは、地面の凹凸による振動の影響を受けるため、警告を感じ取りづらいという欠点がある。
- Off-path mode では、合成音声よりも、Directional Lever を使用した触覚インタフェースを使用した時の方が素早く人を回避することが可能。

また、インタビューの結果、ユーザは周囲の環境音を聞き取りながらシステムからの警告や案内を受け取ることができる触覚インタフェースの方を好むことがわかった。

2. 関連研究

2.1 視覚障害者向けナビゲーションシステム

視覚障害者が目的地へ向かう際の道案内を目的として、視覚障害者向けナビゲーションシステムが提案されている。これらの手法は GPS [21] やビーコン [25] などを用いてユーザの位置推定を行い、目的地への道順をユーザに案内する。しかしながら、これらのシステムは歩行者に代表されるような地図上に記載されていない障害物については考慮していないため、ユーザはこれらの障害物と衝突する可能性がある。実世界においてユーザが安全に目的地へ移動するためには、目的地への道順の案内に加え、経路に存在する障害物をリアルタイムに検出し、回避するためのシステムも必要となる。

2.2 視覚障害者向け衝突回避支援システム

視覚障害者の障害物回避支援を目的として、レーザ [11] やデプスカメラ [13] を用いて障害物の位置、距離、種類などを検出し、ユーザに伝達するシステムが研究されている。しかしながら、これらの手法はシステムからの情報を頼りにユーザ自身が障害物を回避する経路を設計する必要があるため、周囲に障害物が多数存在する環境では障害物を把握することも回避することも困難となる。この問題点を解決するために、障害物を回避する経路をシステムが生成し、ユーザを誘導するシステムが提案されている [13], [28]。しかしながら、これらのシステムは机や椅子といった静止した障害物の回避を対象としているが、歩行者に代表されるような周囲の動く障害物は対象としていない。

既存の衝突回避支援システムの多くは周囲の全ての歩行者はユーザを回避すると仮定し、静止した障害物に注目している。しかし、全ての歩行者がユーザの存在に気づいているとは限らない。歩きスマホをする歩行者や他の人と会話をしている人物など、空港や駅といった公共の場では視

覚障害者の存在を視認していない歩行者が多数存在し、視覚障害者はそのような歩行者と衝突する危険性を持っている。歩行者との衝突回避支援システムとして BBeep[10] が提案されている。BBeep はシステムが周囲の歩行者に対して警告音を鳴らして衝突の危険性を知らせることにより、ユーザに対して経路を譲るように促す。しかしながら、BBeep は周囲に警告音を鳴らすため騒音となりうる、周囲の歩行者が視覚障害者のために道を譲る必要がある、などシステムの社会受容性に関して改善の余地を残している。

2.3 視覚障害者支援システムのインタフェース

2.3.1 音声インタフェース

視覚障害者に対して情報を伝える手段として音声インタフェースは広く普及しており、道案内システム [25] や、歩行中の方向修正システム [1], [5] などが提案されてきた。音声を用いる利点として情報を明瞭に伝達可能という点があるが、視覚障害者が周囲の状況を把握するために聞いている環境音 (エンジン音や足音など) の聞き取りが難しくなってしまうという欠点がある。

2.3.2 触覚インタフェース

環境音の聞き取りと情報の伝達を両立するための解決策として、触覚を用いたインタフェースが提案されてきた。具体的には、振動パターンを用いて進むべき方向を提示するシステム [24], [29] や、形が変わるデバイスを用いて歩行中の方向修正を行うシステム [26], [27] などが提案されている。Animotous[26], [27] はキューブ型のシステムで、手のひらで握ったデバイスの上半分が回転することにより、視覚障害者に正しい進行方向を伝達する。

視覚障害者に情報を伝える手段として、上述のように音声または触覚を用いたシステムが提案されてきたが、各モダリティの有用性はタスクや使用する環境に大きく依存する。例えば、ある調査では視覚障害者は環境音の聞き取りと両立可能な触覚インタフェースを高く評価したと報告している [15] 一方で、別の調査では余計なデバイスを装着する必要がある触覚インタフェースよりも音声インタフェースを好むと報告されている [23]。そこで本研究では、音声または触覚を用いた二種類のインタフェースを実装し、ユーザ実験を通して各インタフェースの有用性を検証した。

3. 提案システム

本研究では、オフィスビルやショッピングモールなどの公共空間において視覚障害者が周囲の歩行者の動きに合わせて衝突を回避しながら移動できるように支援するシステムを提案する。本研究では、ユーザ (視覚障害者) が単独で移動するときに遭遇し得るシチュエーションとして、以下の二種類を対象とする：

- (1) 歩行者がユーザの経路の近くを横切るとき。このとき、歩行者はユーザにとって動いている障害物となる。

- (2) 集団がユーザに背を向ける形で立ち止まっており、ユーザの進路を意図せずに塞いでしまっているとき。このとき、この集団は静止した障害物となる。

これらのシチュエーションに対応するために、提案システムでは On-path mode と Off-path mode の二種類の回避モードをユーザに提供する。

3.1 On-path mode

視覚障害者は普段、点字ブロックや壁などを頼りにしながら移動している。このとき、障害物との衝突を回避するために方向を変えて迂回することは、自分の位置や方向を見失うという不必要なリスクが生じてしまうため好ましくない。そこで提案システムでは、なるべくユーザの経路を変更せずに歩行者との衝突を回避するために、On-path mode を提供する。具体的には上述の (1) のようなシチュエーションに遭遇した際に、システムからユーザに対して歩く速度を遅くする、あるいは立ち止まるように指示することで衝突を回避する。歩行者が通り過ぎ、ユーザの経路が安全になり次第、通常で歩くように指示をする。これにより、ユーザの進路を維持したまま周囲の歩行者との衝突を回避することが可能となる。このとき、速度を調整する指示をリアルタイムにユーザへ伝達するために適したインタフェースをデザインする必要がある。そこで本研究では、音声または触覚ベースのインタフェースを二種類実装し、ユーザ実験を通してそれぞれの有効性を調査した。

3.2 Off-path mode

上述の (2) のシチュエーションのように、ユーザの経路が歩行者によって塞がれている場合は、On-path mode では衝突を回避することができないため、ユーザ自身が歩行者を迂回して回避する必要がある。そこで提案システムは、空いているスペースを利用して歩行者を回避し、もとの経路へ戻る迂回経路を設計し、経路にそってユーザを案内する Off-path mode を提供する。Off-path mode においても適したインタフェースを調査するため、音声と触覚ベースのインタフェースを二種類実装し、ユーザ実験を通して比較検証を行った。具体的には、音声インタフェースとして合成音声をつかって方向を案内するシステムを、触覚インタフェースとして進行方向を指し示すレバー型のデバイス (Directional Lever) を実装した。

3.3 提案システムの使用方法

ユーザは以下のような流れでシステムを利用する (図 1 も参照)。ユーザは通常 On-path mode で歩く。衝突の危険性を検出した場合はシステムが音または振動を用いて警告を行い、ユーザに減速するよう促す。歩行者が通り過ぎ、システムからの警告が止まり次第、ユーザは通常で歩く。歩行者が進路を意図せず塞いでしまっている場

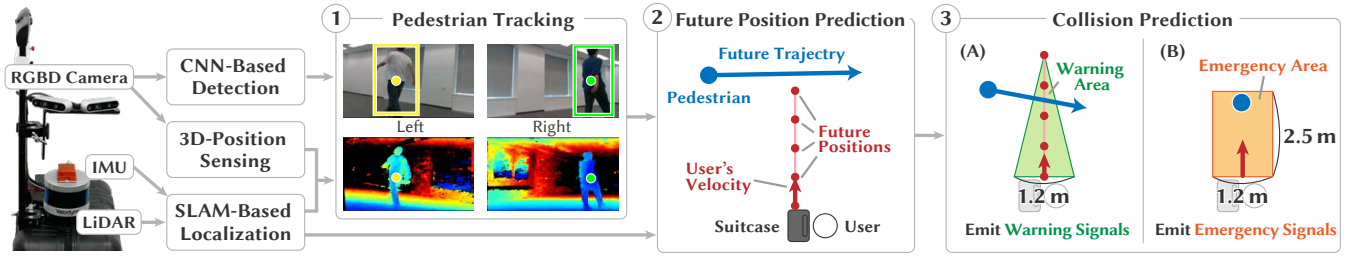


図 2 On-path mode の概要図

合はシステムが警告を続けるため、ユーザはシステムに取り付けられたボタンを押すことにより、迂回用の Off-path mode に切り替えることができる。Off-path mode では、音声もしくは Directional Lever を用いて、迂回する経路に沿って案内する。もとの経路に戻り次第、システムは自動で Off-path mode から On-path mode に切り替わる。

4. 提案システムの実装

4.1 On-path Mode の実装

On-path mode の概要を図 2 に示した。提案システムはスーツケースに取り付けられた LiDAR, IMU および 2 台の RGBD カメラを用いて、ユーザの自己位置推定、歩行者の検出およびトラッキング、そして衝突の予測を行う。各種センサをスーツケースに固定することにより、ブレが少ないデータを取得することが可能になる。

4.1.1 ユーザの自己位置推定

システムは Robot Operating System(ROS)[20] の cartographer パッケージ^{*1}[8] に LiDAR と IMU のセンシング結果を入力することで、事前に用意したマップ上でのユーザの自己位置と方向を推定する。自己位置推定結果をもとにユーザの移動速度および将来位置を予測する (図 2 (2))。

4.1.2 歩行者の検出およびトラッキング

提案システムは二台の RGBD カメラ (RealSense D435^{*2}) を組み合わせることにより、約 $135^\circ \times 42.5^\circ$ の視野角を確保し、歩行者の検出を行う。提案システムでは以下のステップに従って歩行者の検出およびトラッキングを行う。

- (1) COCO データセット [14] で学習させた YOLOv3[22] を用いて歩行者検出を行う。
- (2) 歩行者検出結果と RGBD カメラから得られるデプス情報を対応づけることにより、カメラ座標系での歩行者の位置を取得する。
- (3) 歩行者の位置情報と 4.1.1 で得られた自己位置推定結果をもとに、マップ上での歩行者の座標を計算する。
- (4) マップ上での歩行者の座標をもとに歩行者のトラッキングを行う。トラッキングは、まずカルマンフィルタ [9] によりトラッキング中の各歩行者の位置を予測する。次に各歩行者は地図上で半径 1.0m の円で表さ

れるとし、検出された歩行者位置と予測した歩行者位置の全ての組み合わせの intersection over union (IoU) を計算する。最後に IoU が最大となる組み合わせを Hungarian algorithm[12] により得る。

- (5) トラッキングした歩行者の速度をカルマンフィルタを用いて推定する。

提案システムは歩行者の検出 (ステップ 1-3)、トラッキング (ステップ 4) および速度の推定 (ステップ 5) を同時に別スレッドで動かす。歩行者検出はそれぞれのカメラごとに行い、トラッキング以降のステップは二つのカメラの検出結果を合わせて行う。提案システムで使用したラップトップ (Intel Core i7-8750H CPU @ 2.20GHz, NVIDIA GeForce GTX 1080 Mobile GPU) では、約 4-5 FPS で歩行者の移動速度を出力可能であることを確認した。

4.1.3 歩行者との衝突予測

次にシステムは検出結果から歩行者との衝突の危険性を予測する。提案システムでは図 2 (3) A に示したエリアを “Warning Area” と定義し、このエリアと歩行者の将来軌道が交差する時、衝突の危険性があると判定し警告を発する。Warning Area は、底辺が 1.2m、頂点がユーザの 4 秒後の位置で定まる三角形である。また、図 2 (3) B のようにユーザ前方 $1.2 \times 2.5m$ の長方形のエリアを “Emergency Area” と定義した。このエリア内に歩行者が存在する場合はシステムから緊急度の高い警告を発することで、ユーザに直ちに立ち止まって衝突を回避するように指示をする。

4.2 Off-path Mode

4.2.1 回避経路の生成

Off-path mode においてユーザを案内するために、提案システムは事前に安全な経路が登録されたマップを使用する。本研究で行ったユーザ実験では、フロア上に敷いてある点字ブロックを安全な経路として登録した。本論文での実装では点字ブロック上を案内したが、他にも壁や既存のナビゲーションシステム [13], [25] によって生成された経路も、安全な経路として登録することが可能である。

ユーザの経路上で立ち止まっている人物を回避する経路を生成するために、システムはユーザの現在位置と現在位置から 5m 先にある点字ブロック上を、それぞれ Off-path mode におけるスタート地点とゴール地点に設定す

^{*1} <http://wiki.ros.org/cartographer>

^{*2} <https://www.intelrealsense.com/depth-camera-d435/>

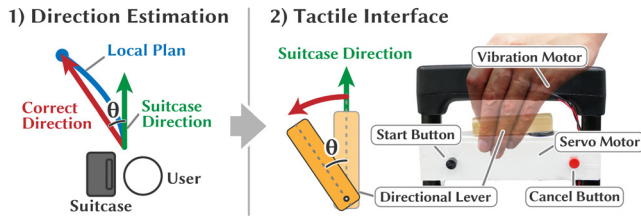


図 3 1) Off-path mode における進行方向の提示。
2) 触覚インタフェースの概要図。

る。次にシステムはスタート地点を出発して歩行者を回避し、ゴール地点へ向かう経路を ROS の Navfn global path planner^{*3} と DWA local path planner^{*4} [6] を用いて生成する。Navfn を用いることで、LiDAR からの検出結果をもとに歩行者や壁、静止した障害物を回避する安全な経路を生成することが可能となる。通路全体が歩行者のグループで塞がれている時など、Navfn が安全な経路を生成できない場合は、システムから警告を発し続け、ユーザに対して安全な経路が生成されるまで待機するように指示する。

4.2.2 進行方向の計算

ユーザがゴール地点に到着するまで、DWA local path planner は短期的にユーザが進むべき経路を示した local plan を生成する (図 3 (1))。提案システムは、local plan の終端とユーザの位置を結ぶ直線をユーザが進むべき方向 (Correct Direction) と定義し、SLAM によって推定されたスーツケース型システムの方向 (Suitcase Direction) と Correct Direction の成す角 θ を計算する (図 3 (1))。

4.3 警告および案内のためのインタフェース

4.3.1 音声インタフェース

音声インタフェースとして本研究では、ユーザがなるべく環境音を聞きながら音声による指示を受け取ることができるよう、骨伝導ヘッドセットを使用した。音声インタフェースは On-path mode ではビープ音を用いてユーザに衝突の危険性を知らせる。ビープ音は、病院で緊急状況を知らせる目的 [16] や自動車のドライバに障害物との衝突の危険性を知らせる目的 [17] で使用されている。また、音の高さや間隔といったビープ音のパラメタに関して、受け手が感じる緊急度について調査が行われている [4], [17]。本研究では既存の警告システム [10], [18] を参考に、ビープ音の高さ、間隔および、長さを調整することにより、緊急度が異なる二種類のビープ音を用意した (表 1)。

Off-path mode では、「右へ」、「左へ」、「直進」の三種類の指示を 1 秒間隔でユーザに伝えるシステムを実装した。上述の指示は、視覚障害者を特定の物体へ案内する音声システム [5] で使用されているものである。既存の調査から視覚障害者に対して角度を細かく指示した場合、角度の調

表 1 実験で使った警告パターン

インタフェース	緊急度	長さ	間隔	高さ
音声	低	0.5 s	0.5 s	400 Hz
	高	0.1 s	0.1 s	1000 Hz
触覚	低	0.5 s	0.5 s	N/A
	高	Inf	N/A	N/A

整に時間がかかってしまうことが明らかにされているため [25]、本研究では上述のシンプルな指示をユーザに伝えるシステムを実装した。音声インタフェースは、4.2.2 で計算した Correct Direction と Suitcase Direction の成す角 θ に基づいて「右へ」もしくは「左へ」と指示し、 θ の絶対値が 10 度以下の時は「直進」と指示する。

4.3.2 触覚インタフェース

On-path mode において触覚による警告を行うために、Arduino Uno Rev3^{*5} に接続された二つの振動子 (T.P.C., FM34F) をスーツケースのハンドルに取り付けた (図 3 (2))。既存研究によって振動の間隔が短い振動パターンほど受け手は高い緊急度を感じることが明らかになっている [19]。これら既存調査に基づき、一定間隔で振動する緊急度の低いものと、振動し続ける緊急度の高いものの 2 種類の振動パターンを用意した (Table 1)。

Off-path mode において Correct Direction を伝えるための触覚インタフェースとして、本研究では図 3 に示すようにレバー型のデバイス (Directional Lever) をスーツケースのハンドルの真下に取り付けた。Directional Lever は Arduino Uno Rev3 で制御されるサーボモータを動力にしてレバーの角度を変えることで、Correct Direction を直接指し示す。Directional Lever が大きく方向を変えてしまうとスーツケースを持ちづらくなるため、提案インタフェースでは Directional Lever の指し示す方向が -30° から 30° の範囲におさまるようにクロップした。

5. 視覚障害者による評価実験

本研究では視覚障害者によるシステムの評価実験を行ない、主に 1) 提案システムを使用することで歩行者との衝突を回避可能か、2) 音声と触覚どちらのインタフェースが適しているか、の二点を検証した。実験では 14 名 (男性 6 名、女性 8 名、平均年齢 50.43) の全盲の視覚障害者を実験参加者として集めた (表 2)。P1 から P13 の 13 人の参加者は白杖を、P14 は盲導犬を普段から使用して移動している。

5.1 実験タスク

実験環境として、1) コントロール環境：実験者がユーザの経路を横断もしくは塞いでいる環境、2) 実環境：不特定多数の人が行き交う環境、の二種類を用意し、各環境内に敷かれた点字ブロック上を歩くタスクを参加者に与えた。

^{*3} <http://wiki.ros.org/navfn>

^{*4} http://wiki.ros.org/dwa_local_planner

^{*5} <https://store.arduino.cc/usa/arduino-uno-rev3>

表 2 実験参加者のデータと各インタフェースに対する SUS スコア
(*と**は acceptable, unacceptable と評価されたもの.)

実験参加者のデータ			SUS スコア (ランク)	
ID	性別	年齢	音声	触覚
P01	女性	44	85 (A+*)	77.5 (B+*)
P02	男性	56	82.5 (A*)	82.5 (A*)
P03	男性	48	90 (A+*)	92.5 (A+*)
P04	女性	47	67.5 (C)	62.5 (D)
P05	女性	48	72.5 (C+*)	72.5 (C+*)
P06	女性	57	65 (C)	65 (C)
P07	女性	51	87.5 (A+*)	87.5 (A+*)
P08	女性	43	45 (F**)	52.5 (D)
P09	男性	40	72.5 (C+*)	75 (B*)
P10	男性	70	57.5 (C)	47.5 (F**)
P11	女性	32	77.5 (B*)	70 (C)
P12	男性	55	75 (B*)	72.5 (C+*)
P13	男性	69	90 (A+*)	95 (A+*)
P14	女性	46	97.5 (A+*)	97.5 (A+*)

参加者は右手に白杖を、左手にシステムをもって移動した。

5.1.1 コントロール環境

音声と触覚のインタフェースを同じ条件下で比較するために、長方形の部屋の中に 16m の点字ブロックを敷いたコントロール環境を用意した。コントロール環境での実験では実験者が、A: 参加者の前を二度横切る、B: 点字ブロック上で立ち止まり経路を二度塞ぐ、という二種類のコンディションを用意した (図 4 (1))。特に A のコンディションでは、実験者が参加者とちょうど衝突するような速度およびタイミングで歩き始めた。本実験では、二種類のコンディションと二種類のインタフェースの組み合わせを変えつつ、点字ブロック上を四回歩くタスクを与えた。

5.1.2 実環境

本研究ではコントロール環境に加え、点字ブロックが約 180m 敷かれているオフィスビルの一階 (図 4 (2)) を実環境として選び、実験を行なった。今回使用した環境は、オフィスの出入り口、トイレ、コンビニエンスストア、コーヒショップなどが立ち並び、不特定多数の人が行き交う場所であり、実際にユーザが使用する際の環境を想定したものである。実験時には、実験者が二箇所で開催者の前を横切る、一箇所点字ブロック上で立ち止まっている、という二種類の状況も用意した。参加者は各インタフェースを使用しながら、点字ブロック上を合計二回歩いた。

5.2 実験手順

実験では初めに実験の概要説明と単独歩行に関するアンケートを行った。アンケートではヘッドセットから指示を受けながら一人で歩くことに関する意見を集めた。次に音声と触覚インタフェースについて説明を行い、参加者が各システムに慣れるためのトレーニングセッションを 10 分から 20 分程度行った。音声インタフェースの音量はトレ

ニングセッション中に各参加者の好みに合わせて調整した。また、衝突予測を安定させるためになるべくスーツケースの向きをユーザの進行方向と合わせるように指導した。

次にコントロール環境で短い経路を歩くタスクを与え、タスク完了時間および実験者との衝突回数を測定した。実験では、二種類のインタフェース (音声と触覚) と二種類のコンディション (コンディション A と B) の組み合わせを変えつつ、四回歩くタスクを与えた。各インタフェースとコンディションの順序は参加者ごとにランダムに選択した。コントロール環境での実験が終了後、参加者に各インタフェースに関する主観評価アンケートをおこなった。質問文は以下に示した四項目で、各質問文に対して同意するかを七段階のリッカート尺度 (全く同意しない場合を 1、強く同意する場合を 7) で回答する形で集計した。

Q1: 音声インタフェースは、On-path mode において速度を調整しながら人を回避する際に有効だった。

Q2: 触覚インタフェースは、On-path mode において速度を調整しながら人を回避する際に有効だった。

Q3: 音声インタフェースは、Off-path mode において道を塞いでいる人を回避する際に有効だった。

Q4: 触覚インタフェースは、Off-path mode において道を塞いでいる人を回避する際に有効だった。

上述の質問項目に加え、それぞれのインタフェースの利点、欠点について自由回答形式でコメントを集めた。

最後に実環境での実験を行った (図 4 (2), 図 5)。参加者はまずトレーニングセッションとして、各インタフェースを使用しながら図 4 (2) に示したルートを二回移動し、その後本番として各インタフェースを使用しながら同じルートを二回移動した。実験中は参加者の安全を確保するために一人の実験者が参加者の背後を歩いたが (図 5)、衝突の危険が差し迫った時や参加者がルートから大きく外れた時以外はサポートを行わなかった。実験では周囲の歩行者との衝突が差し迫り、実験者が参加者を止めた回数を数えた。

全てのタスクが終了した後、参加者に対してアンケートを行った。参加者はコントロール環境後に行ったアンケートと同じ四項目 (Q1-Q4) に加えて、以下に示した二項目で、歩行時に案内の指示を与える手段として各インタフェースが好ましいかどうかを七段階のリッカート尺度 (1 が非常に好ましくない、7 が非常に好ましい) で評価した。

Q5: 音声インタフェースは歩行中に案内の指示を与える手段として好ましい。

Q6: 触覚インタフェースは歩行中に案内の指示を与える手段として好ましい。

さらに、参加者は各インタフェースに対して、System usability scale (SUS) [3] の質問項目に回答した。最後に自由回答形式で各インタフェースに関する意見を集めた。本実験では一人の参加者あたり、実際に歩くタスクに約 45 分、実験全体では約 90 分の時間を要した。

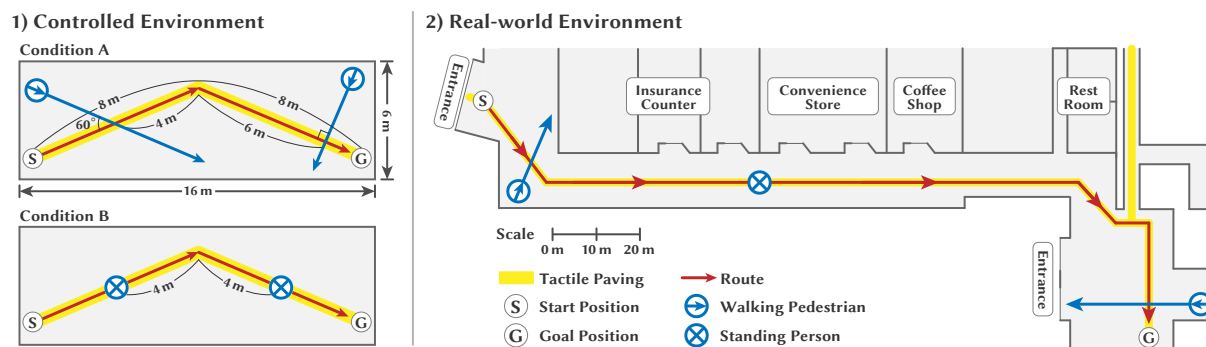


図 4 評価実験で使した 2 種類の環境 (1: コントロール環境, 2: 実環境) の地図。



図 5 視覚障害者による実環境での評価実験の様子。

6. 結果

6.1 音声インタフェースの使用について

全ての参加者が、一人で歩く際に音声で指示を受けることは、周囲の環境音が聞こえづらくなってしまうため好ましくないとコメントし、14 人中 11 人は歩いている最中にヘッドセットは使用しないとコメントした: A1:「一人で歩いているときは足音や車のエンジン音などを聞きながら歩いている。ヘッドセットをつけるとこれらの音が聞こえづらくなってしまうため、歩きながらヘッドセットは使わない」(P3); A2:「交差点などで目的地への案内の指示をヘッドセットで聞く時は必ず壁際など安全な場所で聞くように心がけている。」(P9); A3:「ヘッドセットから音声による指示が聞こえるとそちらに集中してしまうことがある。実際、歩行中にヘッドセットを使っていた時に車とぶつかりそうになったこともある。」(P10)。残りの三名 (P11–P13) は、歩きながら音声による案内システム (Google Map など) を使うことがあると回答したが、全員が歩きながらヘッドセットを使うリスクについて同意した。

6.2 提案システムのパフォーマンス

6.2.1 歩行者との衝突回数

コントロール環境において、全ての参加者が実験者と衝突することなくゴール地点に到着した。実環境において参加者は点字ブロック上で立ち止まって塞いでいる人と遭遇することはなかったが、近くを横切る人とは何度か遭遇し、参加者は横切る人に対して On-path mode を使用しながら歩く速度を調整することで衝突を回避した。また、多くの参加者はシステムを使って経路上に配置した実験者 (二回

経路を横切り、一回経路を塞ぐ) を回避したが、三人の参加者 (P11, P13, P7) は実験者と衝突寸前まで近づいてしまった。衝突を回避できなかった原因は二種類あり、まず一つ目は、P11 と P13 の二名がシステムが発する振動パターンを検出することができなかったためである。また、P7 は音声インタフェースで Off-path mode を使用した時に、システムは道を塞いでいる人を左側から回避する経路を生成していたが、スーツケースが左側を向いていたため、「直進」という指示を出してしまい、P7 が指示に従って直進した結果、衝突寸前まで近づいてしまった。

6.2.2 タスク完了時間

表 3 に、コントロール環境において各インタフェースを使用した際のタスク完了時間の平均と標準偏差および 95%信頼区間を示した。また各コンディションについて、二つのインタフェースを Wilcoxon の符号順位検定で比較した際の p 値を記載した。検定の結果、Off-path mode を使用するコンディション B において、音声よりも触覚インタフェース (Directional Lever) を使用した時の方が、有意に早く人を回避可能であることがわかった。一方で、On-path mode を使用するコンディション A においてはタスク完了時間に関して有意差は得られなかった。

6.3 システムの主観評価

アンケート結果および Wilcoxon の符号順位検定で得られた p 値を図 6 に示した。本実験では二つの質問項目に関して統計的な有意差を確認した。まず Q2 において、コントロール環境に比べて実環境において、触覚インタフェースの On-path mode (振動パターンで警告を行う) の有効性が有意に低下したことを確認した。また、指示を与える手段としての好ましさを調査した Q5 と Q6 を比較したところ、参加者は触覚インタフェースの方を有意に好むことが確認された。特に Q6 では 14 人中 12 人が触覚インタフェースを好ましいと評価した (5 点以上の点数をつけた)。

表 2 に各参加者の SUS スコアを示した。SUS スコアの平均と標準偏差は、音声 が 76.1 と 13.7、触覚 が 75.0 と 14.6 であった。SUS スコアは評点に応じて “acceptable”

表 3 タスク完了時間の平均と標準偏差, 信頼区間, Wilcoxon の符号順位検定の結果 (p 値).

実験コンディション	音声インタフェース		触覚インタフェース		p 値
	平均と標準偏差	95%信頼区間	平均と標準偏差	95%信頼区間	
コンディション A (On-path mode)	36.3 $\pm$ 5.85	32.8 ~ 39.8	39.4 $\pm$ 8.60	34.3 ~ 44.6	0.23
コンディション B (Off-path mode)	59.5 $\pm$ 9.97	53.5 ~ 65.5	53.6 $\pm$ 8.08	48.7 ~ 58.4	0.015*

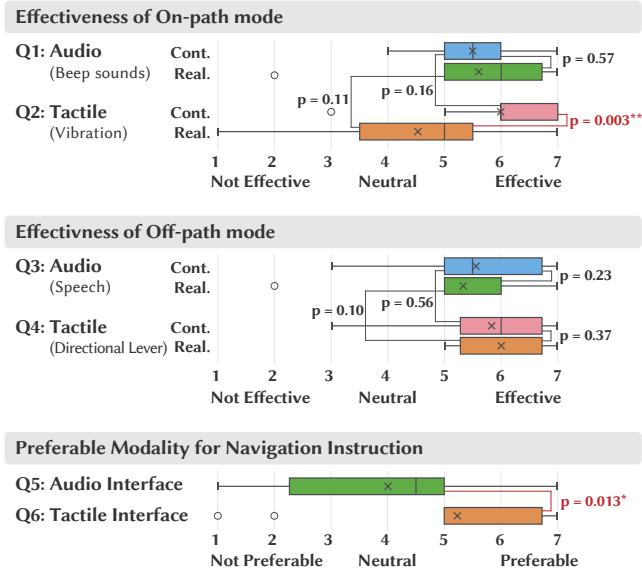


図 6 アンケート項目の結果. Cont.: コントロール環境での結果, Real.: 実環境での結果, p : Wilcoxon の符号順位検定で得られた p 値 (*と**はそれぞれ有意水準が 0.01 と 0.001 の時に有意差が得られた結果).

(71.1 点以上) もしくは “unacceptable” (51.6 点以下) という評価を与えることができる [2]. 今回の結果では十人が音声インタフェースを acceptable と評価した一方で、一人 (P8) が unacceptable と評価した. 触覚インタフェースは九人が acceptable と評価した一方で、一人の (P10) は unacceptable と評価した. unacceptable と評価した二人の参加者は主にスーツケース型システムの形や重さについて指摘した (6.4 システムに関するフィードバックも参照).

6.4 システムに関するフィードバック

6.4.1 衝突回避支援システム全般について

多くの参加者が On-path mode は歩行者の回避に有効であるとコメントした: A4: 「普段、周囲の音を聞くことに集中しながら歩いているが、このシステムは衝突の危険性を知らせてくれるため、楽に自信を持って歩くことができた。」 (P13); A5: 「前方に障害物がないときはシステムからの警告が来ないため、安心して歩くことができて良かった。」 (P8); A6: 「職場 (点字図書館と盲学校) では他の視覚障害者と衝突することが多々あるため、職場でこのシステムを使用したい。」 (P11). また、Off-path mode に関しても好意的なコメントが得られた: A7: 「これまで他の人が道を塞いでいたときは声をかけて自分のために退いてもらっていたが、このシステムを使うことでそのような人を自分

の力で避けることができた。」 (P12); A8: 「障害物を避けようとして方向を変えると自分の位置や方向を見失うことが多々あるが、このシステムは元の経路に必ず戻るように案内してくれるため有用だった。」 (P7).

一方で、九人の参加者からシステムの大きさや重さを指摘された: A10: 「このシステムは日頃持つて歩くには大きく、重すぎる。」 (P10); A11: 「白杖を持つて歩くときは片方の手を常に空けておきたい。」 (P6); A12: 「スーツケース自体が大きいので、特に混雑した環境ではスーツケースが他の人とぶつかってしまうリスクがあると思う。」 (P8). また、触覚インタフェースの大きさを小さくしてほしいという要望も得られた: A13: 「もし触覚インタフェースを白杖に取り付けられるならば日頃から使用したい。」 (P7).

また、Off-path mode では迂回経路を生成するために自走ロボットで広く用いられている ROS の Navfn を使用したが、二人の参加者 (P7, P8) からより滑らかな経路を生成してほしいという意見を得た: A9: 「Off-path mode で歩行者を回避している時に、右、左と交互に指示されることがあり、自分の位置や方向を見失う感覚があった。」 (P7).

6.4.2 音声インタフェースについて

全ての参加者が音声インタフェースはシステムからの指示が明瞭である点を評価した: A14: 「触覚よりも音声の方がフィードバックがはっきりしていたため、素早く反応することができた。」 (P5); A15: 「ビープ音は間隔だけでなく音の高さも変化するため、聞き分けが容易だった」 (P4). 一方で、参加者からは音声インタフェースはたとえ骨伝導ヘッドセットであっても環境音の聞き取りの邪魔になってしまうという意見が得られた: A16: 「普段歩いている時は耳を使って周囲の状況を把握しているため、歩いている最中は可能な限りヘッドセットを身につけたくない. 特にヘッドセットから案内の音声は鳴っている時、周囲の足音を聞き取ることが難しかった。」 (P9); A17: 「周囲の環境音を聞きながら音声の案内に従うことは難しかった。」 (P11).

6.4.3 触覚インタフェースについて

全ての参加者が、触覚インタフェースに関して環境音が聞き取りやすい点を高く評価した: A18: 「白杖、自分の耳、そして触覚インタフェースを組み合わせることで、周囲の状況や衝突の危険性を把握することが容易にできた。」 (P8); A19: 「音声インタフェースは環境音と重なってしまうが、触覚インタフェースは環境音の聞き取りと両立させることができ、新たなセンシング機能として機能した。」 (P11). 一方で参加者の一部から、振動パターンが認識しづらいと

いう報告を得た: A20:「振動パターンは振動の長さで区別する必要があり、音の高さに違いがあるピープ音よりも判別しづらかった。」(P5)。さらに八人の参加者から、振動パターンは床面の凹凸の影響を受けやすいというコメントを得た: A21:「実環境では地面が凹凸のあるタイルだったためスーツケースのハンドル自体が震えてしまい、警告用に振動しているのか、地面の影響で震えているのかの区別がつきづらかった。」(P9); A22:「実環境ではスーツケースが床面の凹凸の影響を受けて振動してしまうため、振動パターンを感じ取ることに集中する必要があった。」(P6)。

Directional Lever についても以下のような好意的な評価が得られた: A23:「レバーが進むべき方向を直接指し示してくれるため、方向を合わせるのに役立った。」(P8); A24:「音声のコマンドよりレバーの方が細かい角度の指示を受け取ることができる。一方で『32度左』といったように細かい角度を音声で言われても時間がかかり、煩わしいと思う。」(P3)。特に、全ての参加者が Directional Lever はコントロール環境だけでなく実環境でも有効であると評価した: A25:「レバーは地面の凹凸の影響を受けないため、常に有効に機能した。」(P7)。一方で三人の参加者 (P1, P2, P10) が Directional Lever は慣れるまでに時間を要するとコメントした: A26:「レバーは方向を細かく指示してくるため、慣れるまでに少し時間がかかりそう。」(P2)。

7. 議論

7.1 衝突回避支援システムの有用性

コントロール環境と実環境の両方で、ほぼ全ての参加者が On-path と Off-path mode を使い分けながら衝突を回避することができた。また、参加者からもシステムが衝突回避に効果的であるというコメントが得られた (A4-8)。

全ての参加者が、実環境で移動する際に頻繁に音声で指示を出されることは環境音の聞き取りの邪魔になるため危険であるとコメントした (A1-3, A18, A19)。一方で、実験を通して触覚インタフェースの利点として以下の二点を確認できた。まず初めに、ユーザが環境音の聞き取りとシステムからの案内の受け取りを両立可能である点 (A20, A21)。次に、Off-path mode において Directional Lever を用いることで音声よりも早く、立ち止まった人を回避可能である点である。ユーザからは Directional Lever について、進むべき方向を直接指し示してくれる点 (A23, A24) や、振動パターンを用いた警告と異なり床面の影響を受けない点 (A25) などが高く評価された。そのため、参加者は音声インタフェースが触覚よりも指示を聞き取りやすい点を高く評価したが (A14, A15)、全体的には音声よりも触覚インタフェースを好むという結果が得られた (Q5, Q6)。

7.2 振動パターンによる警告

振動パターンを用いた警告は改善の余地が残されてい

る。カーペットが敷かれたコントロール環境では全ての参加者が振動による警告を感じ取ることができたが、凹凸のあるタイルが敷かれた実環境では二人の参加者が振動を感じ取ることができないときがあり、立ち止まった人と衝突寸前まで近づいてしまった。振動パターンの有効性に対する参加者の評価はコントロール環境と比較して実環境では有意に下がり (Q2)、八人の参加者から、実環境では地面の凹凸によるスーツケースの振動と振動パターンが混同してわかりづらかったというコメントが得られた (A21, A22)。

この問題点を解決する方法として、まず振動子をユーザの手首や指などに直接取り付けるという方法があげられる。また、全ての参加者から Directional Lever のような形が変わる触覚デバイスはどちらの環境でも有効だったというコメント (A25) が得られたため、振動パターンの代わりに形が変わるデバイスを使用してユーザに警告するという方法も考えられる。さらに、今回のようにスーツケース型デバイスを押しながら移動する場合は、車輪にブレーキを取り付け、直接速度を調整するという方法も考えられる。

7.3 スーツケース型システムの課題

提案システムでは、ブレの少ない映像を撮影して衝突予測の精度を上げるために、スーツケースに各種センサを取り付けたが、14人中8人の参加者から提案システムは日頃使用するには大きく重すぎる、というコメントが得られた (A11-A13)。本研究ではセンサをラップトップに繋いで提案システムを構築したために重量のあるシステムになったが、これは既存の障害物支援システムも抱えている問題である [13]。今後センサやラップトップ、バッテリーが小型化される、もしくは回線的高速化によりクラウドベースの計算機資源が利用可能になることで、ユーザが日頃から持ち歩くことができる軽量なシステムになると期待している。

7.4 O&M 訓練方法との統合

参加者から、システムからの指示に従って歩行者を回避した経験自体初めてであるというコメントや (A7, A8)、Directional Lever に関して慣れるために時間を要するというコメントが得られた (A26)。現在視覚障害者は、歩行訓練 (O&M (Orientation and Mobility)) を受け、白杖を使用して周囲の環境の把握や安全の確保を行う術を学ぶことが強く推奨されている。しかしながら、このような O&M の訓練に最新の支援機器を取り込む方法は個々の視覚障害者だけでなく、指導する側のコミュニティにおいても未だ確立されていない。多くの視覚障害者が提案システムに限らず最新の支援機器を使用して、より自由に単独で移動できる未来を実現するためには、本研究で得られた知見をコミュニティで共有し、新たな支援機器も取り入れた O&M の訓練方法を模索していく必要がある。

7.5 自走ロボットへの応用

Off-path mode では迂回経路に沿ってユーザが移動するが、本研究の拡張として自走ロボット [7] を用いてユーザを直接誘導することが考えられる。一方で、ユーザがスーツケースを押して歩く提案システムのメリットとして、ユーザが好きな速度で移動可能という点が挙げられる。また、実験を通して Directional Lever によってユーザを経路に沿って案内可能であることも確認された。将来的には、提案インタフェースと自走ロボットがそれぞれの長所を活かして相互に補完しあうことで、ユーザの様々なニーズ（ユーザの好みや歩行能力、慣れた場所か初めての場所かなど）に広く対応可能なシステムへと発展させていきたい。

8. まとめ

本研究では視覚障害者が公共空間で周囲の歩行者の動きに合わせて衝突を回避しながら移動することを支援するシステムを提案した。提案システムは周囲の歩行者の動きを検出することで衝突の危険性を予測する。衝突の危険性が検出された場合、システムはユーザに減速するように促す (On-path mode) もしくは迂回して避ける (Off-path mode) という二種類のモードで衝突回避を支援する。本研究では、音声または触覚を用いたインタフェースを二種類実装し、14 名の全盲の視覚障害者による評価実験を通して各インタフェースの有効性を検証した。評価の結果、ユーザは提案システムを用いることで歩行者との衝突を回避可能であること、Off-path mode でユーザを案内する際に音声より触覚インタフェースの方が素早く回避可能であること、視覚障害者は環境音の聞き取りと両立しつつシステムの指示を受け取ることができる触覚インタフェースを好むことを確認した。今後は、実験で欠点を指摘された振動ベースの触覚システムではなく、参加者に好評だった形状を変えて指示を与える触覚デバイスの開発を進めていきたい。

謝辞 本研究は JST ACCEL (JPMJAC1602), JST 未来社会創造事業 (JPMJMI19B2) の支援を受けた。また、システムの実装でサポートして頂いた IBM Research 村田将之氏に深謝する。

参考文献

- [1] D. Ahmetovic, *et al.* Sonification of Rotation Instructions to Support Navigation of People with Visual Impairment. In *PerCom* '19.
- [2] A. Bangor, *et al.* Determining what individual SUS scores mean: Adding an adjective rating scale. In *JUS* '09.
- [3] J. Brooke, *et al.* SUS-A quick and dirty usability scale. In *Usability evaluation in industry* '96.
- [4] J. Edworthy, *et al.* Improving auditory warning design: Relationship between warning sound parameters and perceived urgency. In *Human factors* '91.
- [5] A. Fiannaca, *et al.* Headlock: a wearable navigation aid that helps blind cane users traverse large open spaces. In

- ASSETS* '14.
- [6] D. Fox, *et al.* The dynamic window approach to collision avoidance. In *IEEE RAM* '97.
- [7] J. Guerreiro, *et al.* CaBot: Designing and Evaluating an Autonomous Navigation Robot for Blind People. In *ASSETS* '19.
- [8] W. Hess, *et al.* Real-time loop closure in 2D LIDAR SLAM. In *ICRA* '16.
- [9] R. Kalman. A new approach to linear filtering and prediction problems. In *Journal of basic Engineering* '60.
- [10] S. Kayukawa, *et al.* BBep: A Sonic Collision Avoidance System for Blind Travellers and Nearby Pedestrians. In *CHI* '19.
- [11] V. Kulyukin, *et al.* Robot-assisted wayfinding for the visually impaired in structured indoor environments. In *Autonomous Robots* '06.
- [12] H. W. Kuhn. The Hungarian method for the assignment problem. In *NRL* '55.
- [13] B. Li, *et al.* ISANA: wearable context-aware indoor assistive navigation with obstacle avoidance for the blind. *ECCV* '16.
- [14] T. Lin, *et al.* Microsoft coco: Common objects in context. In *ECCV* '14.
- [15] M. Martinez, *et al.* Cognitive evaluation of haptic and audio feedback in short range navigation tasks. In *IC-CHP* '14.
- [16] C. Meredith and J. Edworthy. Are there too many alarms in the intensive care unit? An overview of the problems. In *JAN* '95.
- [17] D. C. Marshall, *et al.* Alerts for in-vehicle information systems: Annoyance, urgency, and appropriateness. In *Human factors* '07.
- [18] I. Politis, *et al.* Evaluating multimodal driver displays under varying situational urgency. In *CHI* '14.
- [19] S. M. Pratt, *et al.* Perceived urgency scaling in tactile alerts. In *HFES* '12.
- [20] M. Quigley, *et al.* ROS: an open-source Robot Operating System. In *ICRA* '09.
- [21] L. Risa, *et al.* Drishti: an integrated indoor/outdoor blind navigation system and service, In *PerCom* '04.
- [22] J. Redmon and A. Farhadi. Yolov3: An incremental improvement. In *arXiv* '18.
- [23] K. Rector, *et al.* Exploring Aural and Haptic Feedback for Visually Impaired People on a Track: A Wizard of Oz Study. In *ASSETS* '18.
- [24] D. A. Ross and B. B. Blasch. Wearable interfaces for orientation and wayfinding. In *ASSETS* '00.
- [25] D. Sato, *et al.* Navcog3: An evaluation of a smartphone-based blind indoor navigation assistant with semantic features in a large-scale environment. In *ASSETS* '17.
- [26] A. Spiers and A. M. Dollar. Design and evaluation of shape-changing haptic interfaces for pedestrian navigation assistance. In *TOH* '16.
- [27] A. Spiers, *et al.* Testing a Shape-Changing Haptic Navigation Device With Vision-Impaired and Sighted Audiences in an Immersive Theater Setting. In *THMS* '18.
- [28] I. Ulrich and J. Borenstein. The GuideCane-applying mobile robot technologies to assist the visually impaired. In *IEEE SMC* '01.
- [29] H. Wang, *et al.* Enabling independent navigation for visually impaired people through a wearable vision-based feedback system. In *ICRA* '17.
- [30] W. R. Wiener, *et al.* Foundations of orientation and mobility. American Foundation for the Blind, 2010.